

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Jali Vahlroos

KANTAVAN KERROKSEN PROFILOINTITYÖN KEHITTÄMINEN  
KONEOHJAUKSEN AVULLA ASFALTTIALALLA

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2016



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Maaliskuu 2016**  
**Rakennustekniikan koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80100 JOENSUU  
(013) 260 6800

Tekijä  
Jali Vahlroos

Nimeke  
Kantavan kerroksen profilointityön kehittäminen koneohjauksen avulla asfalttialalla

Toimeksiantaja  
NCC Roads Oy

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä asfalttipohjien kantavan kerroksen profiloinnin kehittämiseen koneohjauksen avustuksella. NCC Roadsin pyrkimyksenä on lisätä koneohjauksen ja tietomallintamisen käyttöä konservatiiviseksi mielletyllä asfalttisektorilla sekä kehittyä jatkuvasti.

Pohjatöiden onnistuminen on tärkeää asfaltointiprosessissa. Koneohjauksen avulla pyritään karsimaan tyypillisimpiä ongelmatilanteita sekä virheitä ja tällä tavoin tehostamaan toimintaa. Lähtökohtana on minimoida raakapohjien epätarkkuuksia ja niistä aiheutuvaa tuotantotehokkuuden heikentymistä.

Opinnäytetyön aihetta tutkittiin toiminnallisesti esimerkkityömaan avulla. Opinnäytetyössä on käsitelty koneohjausavusteisen rakentamisen perusteita, kuten tarvittavia taustatietoja, mittaustekniikkaa sekä itse koneohjausta. Työssä on tuotu ilmi havaintoja sekä ongelmia, joita syntyi työmaan edetessä. Niiden pohjalta on mietitty kehityskohteita ja koneohjauksen mahdollisuuksia.

Kieli

suomi

Sivuja 46

Liitteet

**Asiasanat**

Koneohjaus, asfalttipohja, profilointi, tiehöylä, takymetri



**THESIS**  
**March 2016**  
**Degree Programme in Civil Engineering**

Karjalankatu 3  
80100 JOENSUU  
FINLAND  
(013) 260 6800

**Author**  
Jali Vahlroos

**Title**  
Developing the profiling of the load bearing layer with the assistance of automated machine control

Commissioned by NCC Roads Oy

**Abstract**

The purpose of this thesis was to get acquainted with the developing of profiling of the load bearing layer with the assistance of automated machine control. NCC Roads has an aspiration to increase the usage of automated machine control and infra related building information modelling and to continuously develop the operations in the asphalt sector which is perceived as a conservative branch.

Succeeding in the paver base work plays a major role in the whole asphalt work. The pretension is to strike out the most typical complexities and aberrations and in that way to increase the effectivity of actions with automated machine control. The basis of this thesis is to minimize the inaccuracy in the divisive layer which causes also impaired efficiency.

This thesis is based on a functional research which was put into practice at an example site. The background information, measuring technology and machine control are handled in this thesis. The observations and the problems those were perceived proceeding the site have been reported in this work. Based on these perceptions some development areas and opportunities of automated machine control were conceived.

**Language**

Finnish

Pages 46

Appendices

**Keywords**

Automated machine control, paver base, profiling, motor grader, total station

# Sisältö

Termistö .....	5
1 Johdanto .....	7
1.1 NCC Roads Oy .....	7
1.2 Työn esittely .....	7
1.3 Tutkimusongelma .....	8
1.4 Tavoite .....	9
1.5 Työn toteutus .....	9
1.6 Rajaus .....	9
2 Tutkimuksen teoriapohja .....	10
2.1 Pohjarakentaminen asfalttialalla .....	10
2.2 Kantavalle kerrokselle asetetut vaatimukset .....	11
2.3 Käytettävä mittaustekniikka .....	13
2.3.1 Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät .....	13
2.3.2 Yleistä takymetrimittauksesta .....	15
2.3.3 Muita paikannusteknologioita .....	22
2.4 Koneohjaus .....	23
2.4.1 Koneohjaus- ja tietomalli .....	27
2.4.2 Nykytilanne ja tulevaisuus .....	28
3 NCC:n työmaiden nykytilan kuvaus .....	28
3.1 Perinteiset työmenetelmät NCC:llä .....	28
3.2 Koneohjauksen hyödyntäminen NCC:llä .....	31
4 Havaitut koneohjauksen mahdollisuudet .....	32
4.1 Työmaan esittely .....	32
4.2 Työmaalla käytetty kalusto .....	33
4.3 Havaintoja työmaalta .....	36
5 Työn tulokset .....	40
6 Pohdintaa .....	41
7 Kehitysehdotukset ja jatkotutkimuskohteet .....	43
Lähteet .....	45

## Termistö

Amplitudimoduloitu	Takymetrin elektro-optinen etäisyyden mittaustapa, jossa mittausaallon määrittämä tahti säätää kantoaallon valon kirkkautta [10, 25].
Asfalttipohja	Asfalttipäällysteen alapuolinen tasattu, profiloitu ja tiivistetty kantavaan murskekerrokseen luettava rakennekerros.
ATS-takymetri	Advanced Tracking System. Koneohjauksessa käytetty automaattinen takymetri. [19, 23.]
DGPS	Differentiaalinen GPS. Paikannusmittauksen tietoa korjataan tukiaseman avulla. [10, 293.]
DWG	Drawing. Tiedostomuoto, jota käytetään kaksi- ja kolmiulotteiseen suunnitteluun.
DXF	Drawing eXchange Format. Binäärimuotoinen tiedostomuoto. [19, 40.]
ETRS89	Koordinaattijärjestelmä, European Terrestrial Reference System 1989 [10].
GPS	Global Positioning System. Satelliittipaikannusjärjestelmä, jota ylläpitää Yhdysvaltain puolustushallinto. [10, 282.]
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset.
Koneohjaus	Työkoneen toimintojen ohjausta automatiikan sekä mittaus- ja paikannusteknologian avulla suunnitelman mukaan.
LandXML	Avoin tiedonsiirtoformaatti mittalaite- ja suunnittelujärjestelmien välille [19, 42].

Pulssimoduloitu	Elektro-optinen etäisyyden mittaustapa, joka perustuu lyhytkestoiisiin valopulsseihin [10, 25].
RTK-GPS	Real Time Kinematic GPS. Reaaliaikainen kinemaattinen mittaustapa, joka perustuu satelliittipaikannuksen vaihehavaintoihin. [10.]

# 1 Johdanto

## 1.1 NCC Roads Oy

NCC Roads Oy on yksi pohjoismaiden suurimmista toimijoista asfalttiurakoinnissa, tienhoidossa ja kiviainestoitimuksissa. Vuoden 2015 liikevaihto Roadsien liiketoiminta-alueilla oli 1,24 miljardia euroa (11,8 mrd. SEK) ja liike-tulos noin 37 miljoonaa euroa (349 milj. SEK) [27, 7]. NCC:n toiminta perustuu neljään perusarvoon, jotka ovat rehellisyys, kunnioitus, luottamus ja edistyskellisyys. Edistyskellisyys on käännös termistä "pioneering spirit", jolla tarkoitetaan rohkeutta yrittää ja kehittää uusia työskentely- ja ajattelutapoja. Edistyskellisyys on myös aloitteellisuutta, ennakointia ja energistä työskentelyä sekä kehitystyön korostamista yhteistyökumppaneiden kanssa. NCC:n arvoperusta liittyy vahvasti tutkittavaan aiheeseen, ja tämän takia ne on syytä mainita. NCC Roadsien toiminta-alueisiin lukeutuvat Ruotsi, Norja, Tanska, Suomi ja Pietarin ympäristö. Suomessa yhtiö työllistää noin 450 henkilöä. [13; 14.]

NCC-yhtiöissä on käyty vuoden 2016 taitteessa läpi organisaatiomuutoksia, joilla on selkeytetty eri liiketoiminta-alueiden toimintoja. NCC Roads Oy:n liiketoiminta-alueen nimeksi valittiin NCC Industry, jolla pyritään kuvaamaan työskentelyn prosessinomaista toimintamallia. NCC Industryyn kuuluvat divisioonat ovat kiviaines- ja asfaltti- sekä paalutustoiminta. Suomen asfalttitoiminta on tämän divisioonan sektori. Tienhoito siirrettiin NCC Infrastructuren alle. [15.] Yrityksen nimenä säilyy kuitenkin NCC Roads Oy ja sitä käytetään edempänä tässä opinnäytetyössä.

## 1.2 Työn esittely

Tässä opinnäytetyössä selvitetään esimerkkityömaan avulla, kuinka koneohjauksen hyödyt saataisiin jokapäiväiseen käyttöön pienilläkin työmailla. Opinnäytetyön on tilannut NCC Roads Oy ja se on toteutettu yhteistyössä NCC Ra-

kennus Oy:n ja Geomalli Oy:n kanssa. Aliurakoitsijana asfalttipohjien rakentamisessa toimi Katu-Karhu Oy. Maanrakennuspuolella koneohjausavusteista rakentamista on hyödynnetty varsinkin suuremmissa kohteissa jo pidemmän aikaa. Asfalttipohjien rakentamisessa koneohjausta käytetään vielä kohtalaisen harvoin, mutta NCC Roads Oy:llä on kuitenkin selkeä tavoite lisätä koneohjauksen käyttöä [1].

### 1.3 Tutkimusongelma

Omien kokemusteni pohjalta olen havainnut, että varsinkin pihasuunnitelmat ovat usein puutteellisia tai niitä ei ole ollut lainkaan. Puutteellisten suunnitelmien myötä myös urakkarajat ovat hämärtyneet maanrakentajan ja asfalttiurakoitsijan välillä. Tämä saattaa johtaa tilanteisiin, joissa asfalttiurakoitsija joutuu täyttämään vajaita rakennekerroksia enemmän kuin urakassa on alun perin sovittu. Muita mahdollisia ongelmakohtia syntyy rakennuksen korkoaseman ja pihan katuverkkoon liittämisen kanssa sekä pintavesikaivojen korkoaseman suhteen. Kehittämällä asfalttipohjien rakentamista koneohjattuun suuntaan saadaan kehitettyä samalla myös suunnittelun tasoa ja sitä kautta pienennettyä ylimääräisen ja tehottoman työn määrää.

Lähtökohtana on epätarkkuus raakapohjissa ja siitä aiheutuva tuotantotehokkuuden heikentyminen perinteisessä työskentelytavassa, jota lähdetään kehittämään laadukkaammaksi ja tehokkaammaksi koneohjauksen avulla. Koneohjauksen tarvitseman mittausdatan myötä epäkohtiin päästään tarttumaan jo ennen työhön ryhtymistä. Aikaisemmin tilanteisiin on havahduttu vasta kun tiehöylän kuljettaja on huomannut, ettei kaikki olekaan kunnossa. Tilanteisiin reagoitua voitaisiin parantaa myös ilman koneohjauksen käyttöönottoa. Näissäkin tilanteissa hyödynnettäisiin samaa mittaustekniikkaa kuin koneohjausavusteissa rakentamisessa.

Yleisimmät konkreettiset ongelmat työmailla johtuvat useimmiten puutteellisesta seurannasta ja työvaiheiden tarkastamisesta. Myös suunnitelmat ovat usein puutteellisia tai virheellisiä. Tyypillisiä ongelmatilanteita ovat raakapohjien ali- tai



ylitäytöt, korko-ongelmat pintavesikaivojen ja muiden liitosrakenteiden kanssa sekä suunniteltujen kaltevuuksien kanssa. Pintavesikaivojen korkojen ongelmat liittyvät usein kaivon teleskoopin lasku- tai nostovaraan.

#### **1.4 Tavoite**

Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä käytössä olevaan mittaustekniikkaan ja hyödyntää sitä tehokkaasti työmaalla liittäen se koneohjauksen tuomiin hyötyihin asfalttipohjien rakentamisessa. Työn tavoitteena on tällä tavoin kehittää asfalttipohjien rakentamisen laatua ja tuotantotehokkuutta.

#### **1.5 Työn toteutus**

Työn toteutuksessa perehdytään mittaus- ja koneohjaustekniikkaan, jolla luodaan tietopohja koneohjaukseen perustuvalle rakentamiselle. Tietoperustana käytetään aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, julkaisuja sekä alan asiantuntijoiden avoimia haastatteluja ja sähköpostiviestintää.

Käytännön esimerkkinä opinnäytetyössä toimii Sipoossa sijaitseva NCC Rakennus Oy:n urakoima kerrostalotyömaa As Oy Sipoon Niitty, Manteli ja Pähkinälehto, jossa pihojen asfaltoinnista vastaa NCC Roads Oy. NCC Roads Oy:llä ei ole kyseiselle työmaalle käytettävissä omaa takymetriautomaatiolla varustettua tiehöylää, joten pohjatöiden aliurakoitsijaksi on valittu aikaisempi yhteistyökumppani Katu-Karhu Oy.

#### **1.6 Rajaus**

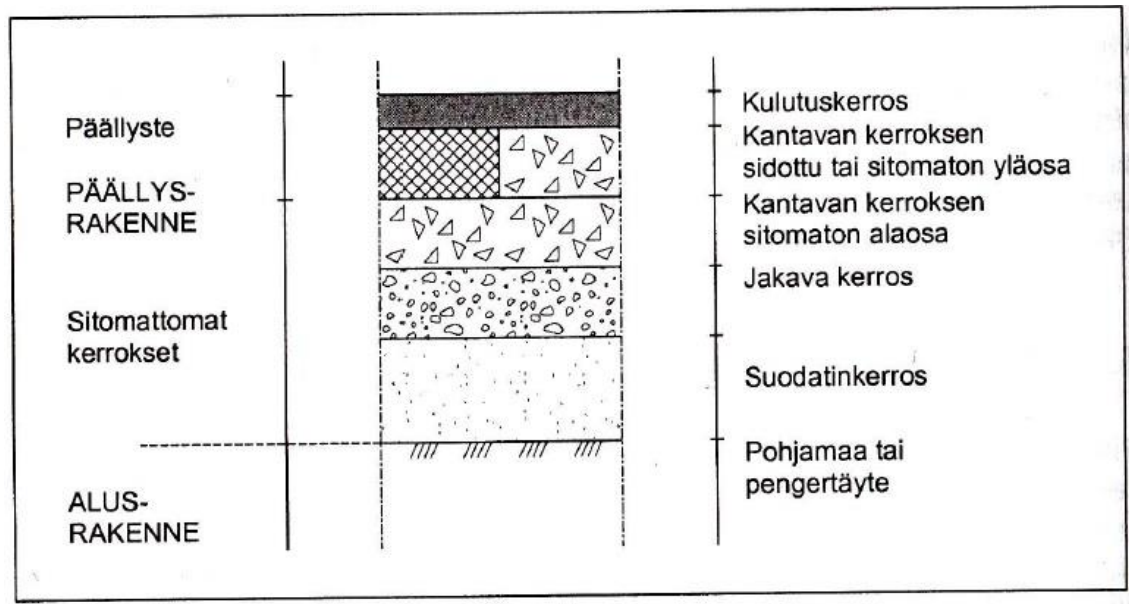
Tähän opinnäytetyöhön kuuluu tutkimusongelman havainnointi esimerkkityömaalla ja johtopäätösten teko sen perusteella. Vaikka tutkimusongelmaan löytyisi todennäköisesti useita eri ratkaisuja, keskitytään tässä opinnäytetyössä

ratkaisemaan ongelma ainoastaan koneohjauksen avulla. Taustatutkimuksena työssä perehdytään rakennekerrosten vaatimuksiin, mittaustekniikkaan sekä koneohjaukseen. Tämän työn aihetta käsitellään teknisestä näkökulmasta, eikä taloudellisiin vaikutuksiin oteta kantaa.

## **2 Tutkimuksen teoriapohja**

### **2.1 Pohjarakentaminen asfalttialalla**

Pohjarakennus mielletään yleensä geotekniikassa käytettäväksi termiksi, jolla tarkoitetaan rakennettavan kohteen perustusten ja maanpinnan alapuolisten kerrosten rakentamista. Näitä rakennustöitä ovat muun muassa louhinta-, kaivu-, tuenta-, kuivatus-, lujitus- ja tiivistystyöt. [2.] Pohjarakentaminen on siis yleisesti ottaen huomattavasti laajempi käsite kuin mitä asfalttipohjien rakentamisessa yleensä tarkoitetaan. Asfalttipohjien rakentaminen kohdistuu kantavaan kerrokseen tai sen ylimpiin osiin. Oikeampi termi olisikin puhua päällysrakenteiden rakentamisesta, joihin lukeutuvat kantavan kerroksen lisäksi myös jakava ja suodatinkerros (kuva 1) [3, 10–11].



Kuva 1. Rakennekerrokset [3, 34]

## 2.2 Kantavalle kerrokselle asetetut vaatimukset

Sitomaton kantava kerros on rakennekerros, joka rakennetaan sitomattomista kiviaineksista ilman lujitteita tai stabilointia. Kantava kerros on päällysteen alapuolinen pohja, joka kantaa ylhäältä tulevat kuormat ja vahvistaa pohjarakennetta. [5.] Kantavalle kerrokselle on asetettu vaatimuksia käytettävien materiaalien, alustan, rakentamistavan ja käyttötarkoituksen mukaan [6].

Kantava kerros on rakennettava CE-hyväksytystä kallio- tai soramurskeesta. Käytettävä kiviaines voi olla raekooltaan 0–32, 0–40, 0–45, 0–56 tai 0–63 mm halkaisijaltaan. [6.] NCC Roads Oy:n asfalttityömailla yleisimmin käytettävä kiviainesmateriaali on kalliomursketta ja rakeisuudeltaan 0–32 mm. Kaikki NCC:n tuottamat kiviainekset ovat CE-hyväksytyjä [7]. Muita kantavan kerroksen kiviainekselle asetettuja vaatimuksia ovat riittävä murtopintaisten rakeiden osuus kiviaineksen joukosta, raemuoto, jäätymis-sulamiskestävyys sekä kestävyys rapautumista vastaan [6].

InfraRYL:n vaatimuksena on, että kantava kerros rakennetaan yhtenäisesti. Kantavan kerroksen kerrospaksuus voi kuitenkin vaihdella 50 mm:stä aina 200

mm:iin saakka riippuen laatuluokasta, aluetyypistä ja rakennettavan maaperän olosuhteista [8]. Kiviainesta voidaan joutua lisäämään, kun pinnan korkeustaso on liian alhainen, pinta on epätasainen tai käytetty kiviainesmateriaali ei ole vaatimustenmukaista. Jos uudelleen tiivistettävä kerros ei ole riittävän paksu, mahdollinen kiviaineksen lisäys on tehtävä jo tiivistetty ja lisättävä materiaali sekoittamalla. Syntyvän kerroksen minimipaksuuden täytyy olla vähintään kaksi kertaa käytetyn kiviaineksen maksimiraekoko. [6.] Työmaalla vastaavia tilanteita syntyy, kun kantavan kerroksen paksuuden täytyy olla yli 50 mm ja asfalttiura-koitsijan urakka koskee vain päällimmäistä 50 mm:ä.

Kiviaineksen kuljetus ja pinnan profilointi on tehtävä siten, ettei kiviaines pääse lajittumaan [6]. Riski lajittumiselle säilyy koko prosessin ajan aina kiviaineksen varastoinnista kuljettamiseen ja lopulta levitykseen työmaalla. Työmaalla lajittumiseen vaikuttavat kuorman purkamisen onnistuminen ja kiviaineksen levityskertojen lukumäärä. Rakennekerroksen tiivistäminen on tehtävä oikein ja oikeanlaisella kalustolla. [6;9.] Valmiin kantavan rakennekerroksen vaatimukset on esitetty taulukoissa 1 ja 2 [3, 90]. Valmiiden pintamateriaalien vähimmäis- ja enimmäiskaltevuudet on esitetty taulukoissa 3 ja 4 [3, 60].

Taulukko 1. Valmiin kantavan kerroksen tiiviysarvot

		Laatuluokka	
		I	II
Pienin sallittu keskimääräinen tiiviysaste	%	≥ 95	≥ 92
Pienin sallittu yksittäinen tiiviysaste	%	≥ 92	≥ 87
Suurin sallittu keskimääräinen kantavuussuhde <sup>*)</sup>	$E_2/E_1$	≤ 2,2	≤ 2,2

<sup>\*)</sup> Käytettäessä levykuormituskoetta. Saa olla suurempi, jos  $E_1$ -arvo on vähintään 50 % vaadittua  $E_2$ -arvosta.

Taulukko 2. Valmiin kantavan kerroksen enimmäispoikkeamat

		Laatuluokka	
		I	II
Yläpinnan leveys	mm	0...150	0...250
Yläpinnan taso	mm	± 20	± 20
Pinnan epätasaisuus	mm/5 m	20	20
Kerros­paksuuden alitus	mm	≤ 10	≤ 20

Taulukko 3. Pintojen vähimmäiskaltevuudet

Päällyste	Sivukaltevuus	Viettokaltevuus
Asfaltti		
– ajorata	0,025...0,030	0,010...0,030
– piha		
– jalkakäytävä	0,020...0,025	
Kiveys, laatoitus		
– ajorata	0,030...0,040	0,020...0,040
– piha		
– jalkakäytävä	0,025...0,030	
Sora, murske		
– ajorata	0,040...0,050	0,020...0,040
– piha		

Taulukko 4. Pintojen enimmäiskaltevuudet

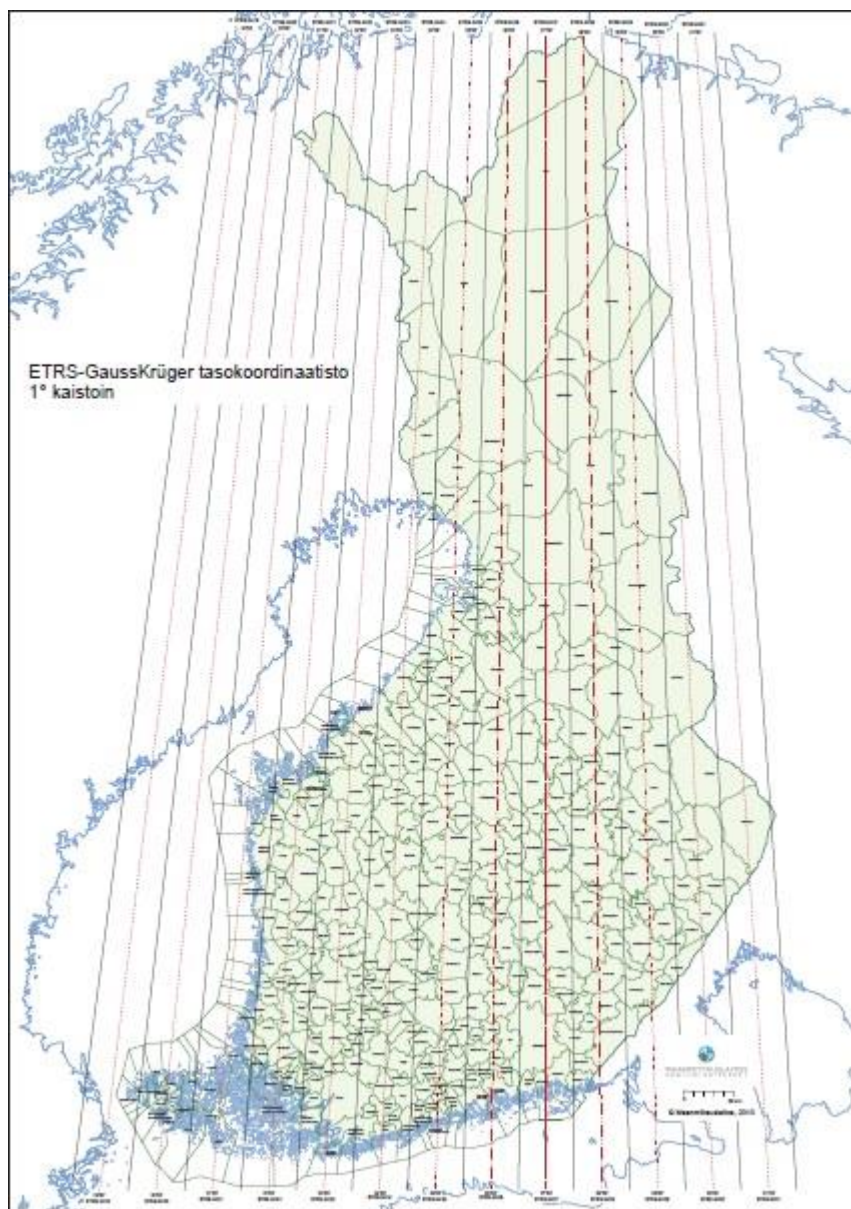
Kohde	Enimmäiskaltevuus	Poikkeus
Tonttatie		
– raskas liikenne	0,05	0,08
– kevyt ajoneuvoliikenne	0,08	0,13
Pysäköinti ja ajokäytävä	0,04	
Lastausalue	0,03	
Luiskat		
– jalankulku	0,10	0,14
– liikuntaesteiset	0,05	0,08
– lastenvaunut	0,10	0,20
Ulkoporras	0,30	0,50

## 2.3 Käytettävä mittaustekniikka

### 2.3.1 Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät

Koneohjausjärjestelmä on aina sidoksissa työmaan ja työskentelevän koneen väliseen paikkatietoon. Periaatteessa paikkatieto voidaan sitoa mihin tahansa koordinaatistoon, mutta yleisimmin se määritellään rakennushankkeen alkaessa, kun kunnan mittamies käy merkitsemässä tontin rajat.

Maanmittauslaitoksen käytössä oleva koordinaattijärjestelmä on ETRS89, jonka kanssa voidaan käyttää joko ETRS-TM35FIN- tai ETRS-GKn-tasokoordinaatistoja, eli karttaprojektioita. ETRS-TM35FIN-tasokoordinaatistoa käytetään suurissa, koko maailman kattavissa kartastoissa, joissa Suomi mahtuu kokonaan yhdelle kaistalle. Pienemmässä mittakaavassa käytetään ETRS-GKn-karttaprojektiota (kuva 2). GK tarkoittaa Gauss-Krügerin projektiota, ja n on koordinaattikaistan keskimeridiaanin asteluku. Suomi jakautuu 13 projektio- ja koordinaattikaistaan. Opinnäytetyön esimerkkityömaalla oli käytössä ETRS-GK25-kaista, jota käytetään yleensä muun muassa Helsingin seudulla. [10, 156, 160–162; 11.]



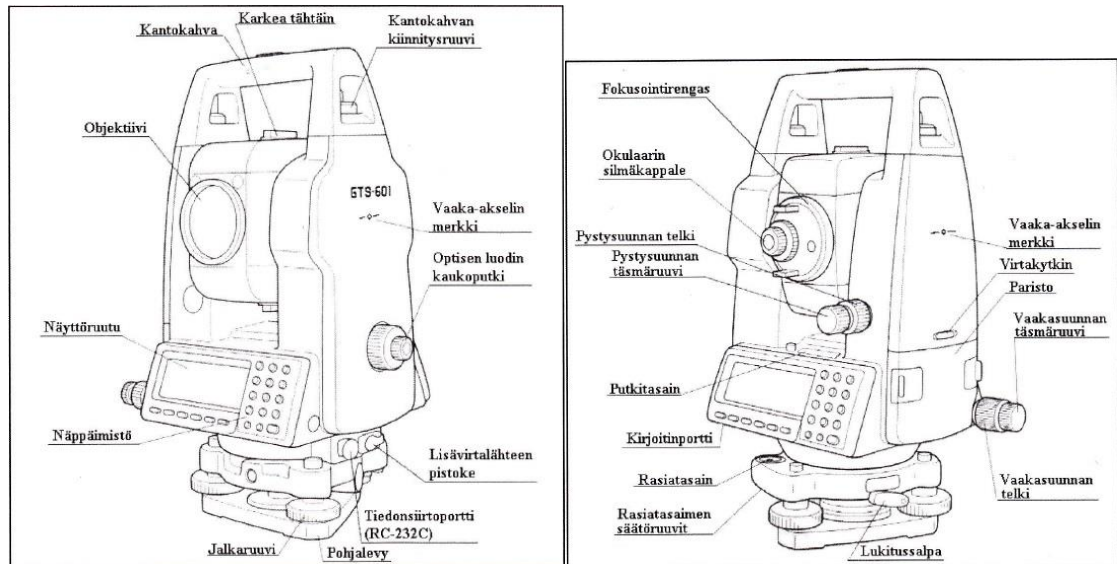
Kuva 2. ETRS-GKn tasokoordinaatisto [11]

Koordinaattijärjestelmän lisäksi toinen tarvittava paikkatieto on korkeusjärjestelmä. Koordinaattijärjestelmillä saadaan ilmoitettua vain kohteen tasosijainti (x- ja y-koordinaatit), kun taas korkeustaso (z-koordinaatti) on aikaisemmin ilmoitettu merenpinnasta mitatuksi etäisyydeksi korkeusjärjestelmän avulla. Nykyisenä suosituksena on käyttää N2000-järjestelmää, joka on Helsingin keskimääräisen merenpinnan korkeuden sijasta sidottu NAP:n (Normaal Amsterdams Peil) määrittämään korkeustasoon. Kansallinen PP2000 kiintopiste N2000-korkeusjärjestelmälle sijaitsee Kirkkonummella Geodeettisen laitoksen observatorion alueella. [10, 165, 168–169;11;12.]

### **2.3.2 Yleistä takymetrimittauksesta**

Työmaan mittauksia aloitettaessa on tiedettävä käytössä olevat koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät. Näiden lisäksi tarvitaan työmaalta kiintopisteet, joiden avulla työmaa sijoitetaan koordinaatistoon. Näitä kiintopisteitä kutsutaan yleisesti liittospisteiksi. Liitospisteisiin sidottu tieto voi sisältää joko tasokoordinaatit, korkeuskoordinaatin tai molemmat. Rakennustyömaalle rakennetaan yleensä väliaikaiset liittospisteet kunnan pitkäaikaisten kiintopisteiden perusteella helpottamaan mittaustyötä. Kulmia ja etäisyyksiä voidaan mitata esimerkiksi vaaituskojeella ja takymetrillä. Vaaituskojetta käytetään kuitenkin yleisimmin korkeudenmittaukseen. Takymetristä on tullut tekniikan kehittymisen myötä yksi työmaan yleisimmin käytetyistä mittalaitteista. Kuvissa 3 ja 4 on esitetty perinteisen takymetrin osat. [10, 8, 203–231.]



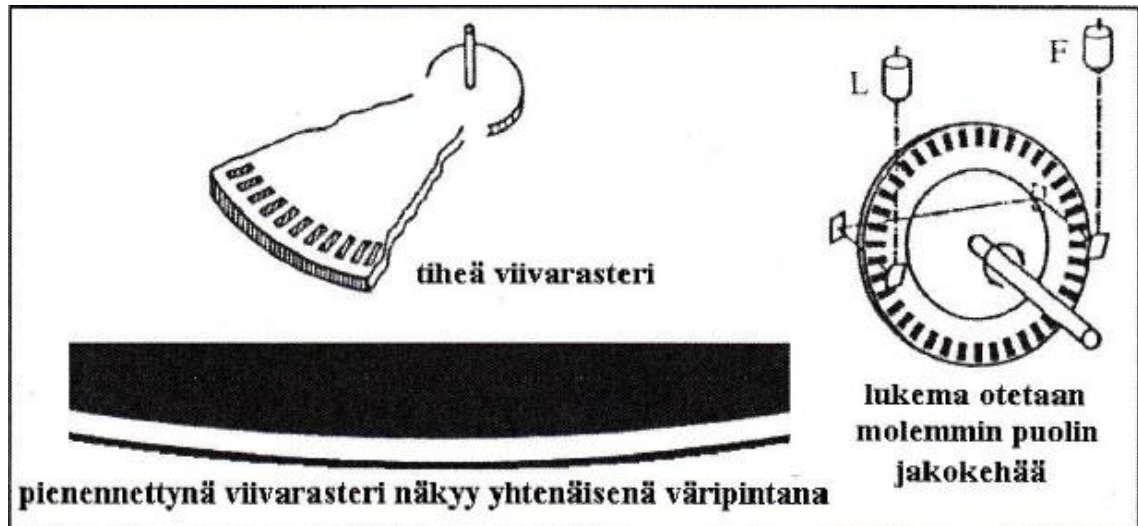


Kuva 3. Vasemmalla on takymetri kuvattuna objektiivin puolelta [10, 241]

Kuva 4. Oikealla takymetri okulaarin puolelta katsottuna [10, 242]

Takymetrin toiminta perustuu elektro-optiseen etäisyyden mittaukseen sekä sähköiseen kulmanlukulaitteeseen. Kulmalukulaite koostuu viivarasteroiduista kulmakehistä tai jakokehistä (inkrementaalikehistä, kuva 5), jotka ovat sähköisesti luettavia. Pulssimittari on anturi, joka laskee viivojen lukumäärän, kun takymetriä kierretään pysty- tai vaaka-akselin ympäri. Kulmakehän vastakkaisilla puolilla sijaitsevien pulssimittarien ohi kulkevien viivojen määrä muutetaan vastaamaan kulmalukemaa. Takymetrien kulmalukulaitteet ovat hyvin tarkkoja. [10, 247–248.] Tyypillisesti tarkkuus voi olla jopa 0,5'' (kulmasekuntia) eli noin 0,1 mgon (milligoonia) [10, 248; 16].





Kuva 5. Kulmanlukulaitteen jakokehä [10, 248]

Etäisyydenmittaus elektro-optisesti perustuu takymetrin lähettämän signaalin ja prismasta palaavan heijastuksen vertailuun. Mittaus tapahtuu takymetrin riip-puen joko kantoaallolle amplitudimoduloidulla tai pulssimoduloilla mittaussig-naalilla. Mitattavan matkan määrittäminen amplitudimoduloidulla signaalilla pe-rustuu vaihe-erojen mittaukseen. Matka saadaan selvitettyä signaalin kulkeman matkan sisältämien kokonaisten aallonpituuksien lukumäärän ja osa-aallonpituuden eli vaihe-eron avulla. Pulssimoduloidussa etäisyydenmittaukses-sa matkan mittaaminen perustuu mittaussignaalin, eli käytännössä valon, kul-kuajan määrittämiseen. Pulssimoduloitua etäisyydenmittausta käytetään esi-merkiksi laserkeilaimissa ja ilman prismaa mittaavissa takymetreissä. Elektro-optisten mittalaitteiden kehitys on mahdollistanut kuitenkin molempien tekniikoi-den hyödyntämisen yhdessä laitteessa, sillä etäisyysmittareiden koko on pie-nentynyt huomattavasti. [10, 239, 249–251, 275.]

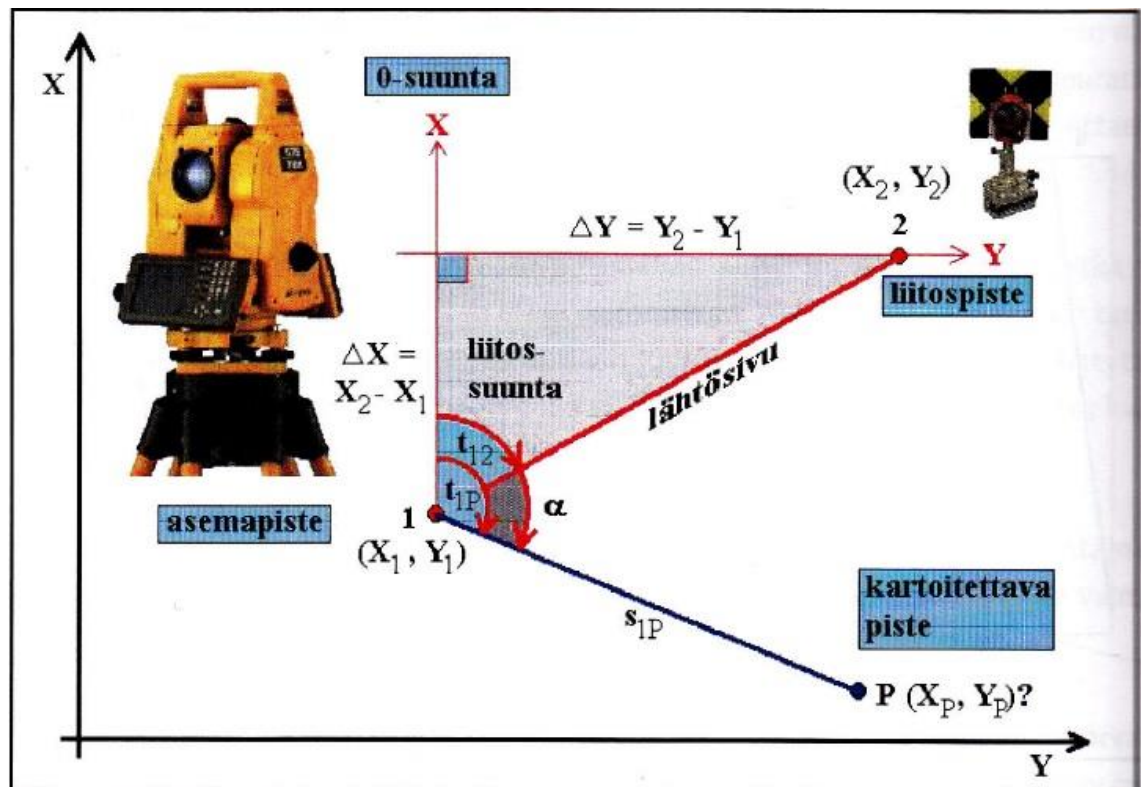
Ennen varsinaista mittaustyötä takymetri on asetettava toimintakuntoon. Kysei-siä aloitustoimenpiteitä ovat laitteen keskitys ja taseus mittauspisteelle, taky-metrin korkeuden mittaaminen sekä sen orientointi. Takymetrin keskityksellä ja tasauksella tarkoitetaan koneen asettamista kohtisuoraan sekä vaaka- että pys-tysuunnassa akseleihinsa nähden. Tämä tehdään pystyttämällä ja säätämällä laitteen kolmijalka silmämääräisesti vaateriin mahdollisimman tasaiselle alustal-le. Takymetri asetetaan myös halutun pistemerkin suhteen oikealle kohdalle op-tisen luodin avulla. Takymetrin vaakatason karkea taseus tehdään rasiata-

saimella seuraten samalla kun kolmijalan jalkojen pituuksia muutetaan. Hienosäätö, eli tarkka tasaus, tehdään käyttämällä putkitasainta ja jalkaruuveja. Uudemmissa takymetreissä putkitasain on usein korvattu sähköisellä tasaimella. [10, 252–256.]

Takymetrin orientoinnilla tarkoitetaan laitteen sijoittamista käytössä olevaan koordinaatti- ja korkeusjärjestelmään. Takymetri voidaan orientoida joko tunnetulle tai vapaalle asemapisteelle. Kahden tunnetun tasorunkopisteen avulla saadaan takymetri orientoitua toiselle näistä tunnetuista pisteistä. Toinen pisteistä on liitospiste, jossa on tai jolle viedään tähys (kuva 6). Koneohjauksessa liitospisteen sijasta käytetään myös termejä kiintopiste tai apupiste [29]. Asemapisteeksi kutsutaan kohtaa, johon takymetri pystytetään. Takymetrin orientointi tapahtuu tähtäämällä asemapisteeeltä liitospisteelle, jolloin vaakakehältä saadaan tähtäyssuuntia, eli suuntakulmia (kuva 7). Orientoidulla takymetrillä mitataan kohteiden koordinaatteja säteittäisellä mittauksella. [10, 257–258.]

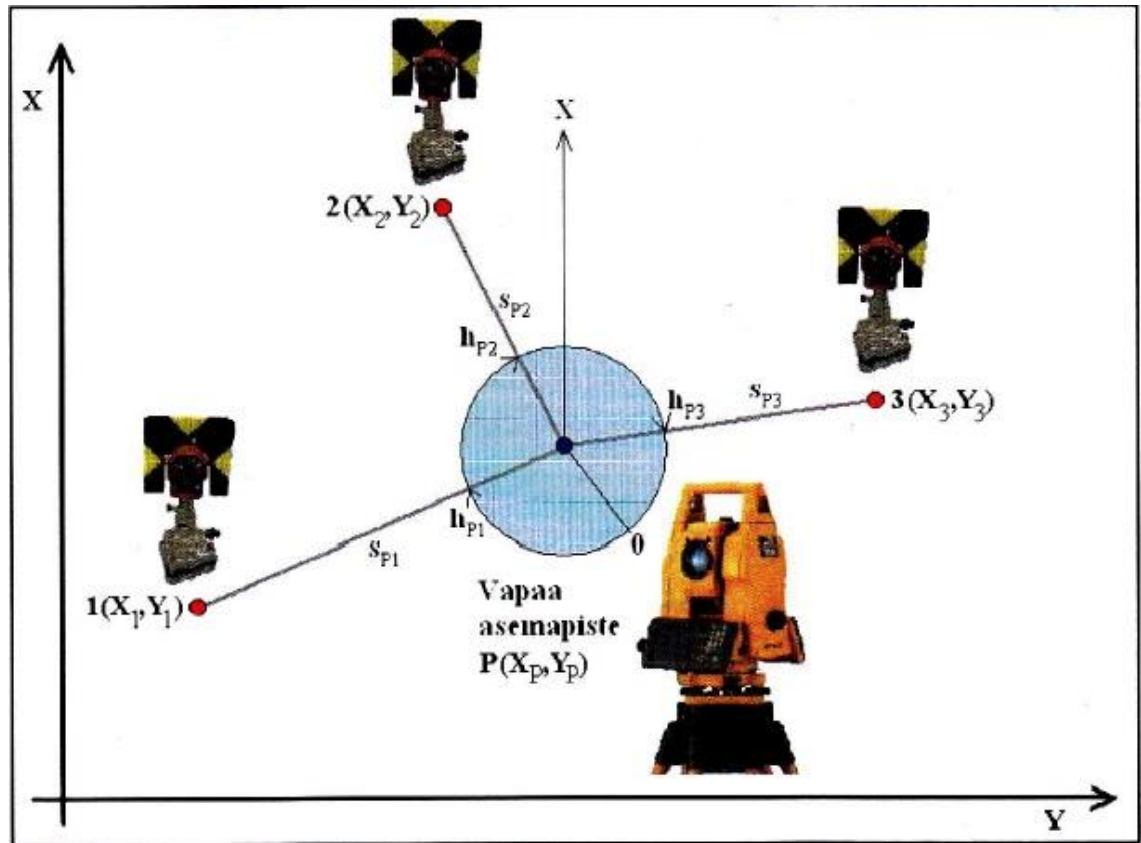


Kuva 6. Rakennusaikainen tähys kiinnitettynä puuhun



Kuva 7. Takymetrin orientointi tunnetulle asemapisteelle [10, 258]

Takymetri voidaan pystyttää myös mielivaltaiseen tuntemattomaan pisteeseen kun tiedetään kahden liitospisteen koordinaatit (kuva 8). Liitospisteiden lukumäärän lisäyksellä voidaan parantaa mittaustuloksen luotettavuutta. Orientointi vapaassa asemapisteessä tapahtuu muuten vastaavasti kuin tunnetussa pisteessä, mutta liitospisteiden avulla selvitetään vapaan asemapisteen koordinaatit. Liitospisteistä mitataan sekä suunnat että etäisyydet, joiden perusteella takymetri laskee oman sijaintinsa. [10, 259–260.]



Kuva 8. Takymetrin orientointi vapaalta asemapisteeltä [10, 260]

Työmaata ei ole välttämättä erikseen liitetty tai suunniteltu mihinkään tiettyyn absoluuttiseen koordinaatistoon. Tällöin takymetri voidaan asettaa mielivaltaisesti valittuun pisteeseen, joka merkitään nollapisteksi ( $x, y, z = 0, 0, 0$ ). Yleensä kyseiseksi pisteeksi kannattaa valita työmaan nurkkapiste tai muu vastaava piste, josta koordinaatiston muodostaminen on helppo aloittaa. Takymetriä ei näin ollen orientoida mihinkään tiettyyn koordinaatistoon, vaan koordinaatisto joudutaan itse rakentamaan takymetrin mittaustulosten perusteella. Myös korkeusasema on tällöin määritettävä suhteellisesti valituista kiintopisteistä, kuten rakennuksesta tai olemassa olevan tien tasosta. Taulukossa 5 on eritelty suhteellisen mittaustavan eroja verrattuna absoluuttiseen mittaustapaan. [10, 266.]

Taulukko 5. SWOT-analyysi absoluuttisen ja suhteellisen mittauksen eroista

Vahvuudet	Heikkoudet
<b>Absoluuttinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Olemassa olevat suunnitelmat</li> <li>• Jokainen työmaan piste määritettävissä</li> </ul> <b>Suhteellinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voidaan toimia ilman valmista suunnitelmaa</li> <li>• Vanhat ja korjattavat kohteet</li> </ul>	<b>Absoluuttinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahdolliset virheet suunnitelmassa</li> <li>• Suunnitelmien muuttaminen hankalaa, koska suunnitelmat täytyy käyttää suunnittelijalla</li> </ul> <b>Suhteellinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suunniteluun kuluu resursseja työmaalla</li> <li>• Aloittaminen hankalaa -&gt; koordinaatiston kehittäminen</li> </ul>
Mahdollisuudet	Uhat
<b>Absoluuttinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tietomallinnus ja koneohjaus</li> </ul> <b>Suhteellinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suunnitelmat myös vanhoista kohteista -&gt; elinkaaren jatkaminen</li> <li>• Kohteet, joissa tarkastetaan yksittäisen asian toimivuus</li> </ul>	<b>Absoluuttinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Epäselvyydet käytettävästä koordinaatistosta (mittamies, suunnittelija ja rakentaja)</li> </ul> <b>Suhteellinen mittaus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Virheiden määrän lisääntyminen kun liitetään koordinaatistoa (jos ei käytetä tunnettua koordinaatistoa)</li> </ul>

Nykyiset takymetrit ovat usein niin sanottuja robottitakymetrejä, jotka toimivat servomootoreiden avulla. Automaation myötä takymetrien käyttö on helpottunut ja monipuolistunut. Lisäksi mittaustyö on tarkentunut. Robottitakymetrin automaatio mahdollistaa muun muassa laitteen etäkäytön prisman puoleisesta päästä. Muita helpottavia ja nopeuttavia ominaisuuksia ovat kohdetähtäyksen tai prisman automaattinen paikannus ja kohteen mittaus. Tähän perustuu muun muassa 3D-koneohjaus. [10, 275; 16; 17.]

Kiteytettynä voidaan siis sanoa, että takymetri määrittää oman sijaintinsa tunnettujen pisteiden avulla mittaamalla etäisyyden ja kulman niihin nähden. Tämän jälkeen takymetrillä voidaan määrittää minkä tahansa prisman sijainti työmaalla, kuten esimerkiksi mittamiehen prisma-auvan tai koneohjausprismamaston sijainti.

### 2.3.3 Muita paikannusteknologioita

Takymetrin lisäksi muita yleisesti käytettyjä paikannusteknologioita koneohjaus-avusteisessa rakentamisessa ovat GPS-, DGPS- ja RTK-GPS-järjestelmät. Työmaalle valittavaan paikannusteknologiaan vaikuttavat työvaiheen tarkkuusvaatimukset, tekniikan soveltuvuus haluttuun käyttötarkoitukseen sekä käytöstä aiheutuvat kustannukset. Koneohjausjärjestelmät on usein integroitu käytettäväksi ennalta määrättyjen paikannusjärjestelmien kanssa. [19, 27.]

GPS-, DGPS- ja RTK-GPS-paikannusjärjestelmät ovat satelliittipaikannusjärjestelmiä, joiden toiminta perustuu kolmeen mittautapaan. Näitä mittautapoja ovat absoluuttinen, differentiaalinen ja suhteellinen paikannus. Kyseinen jaottelu perustuu eri mittautekniikoiden erilaisiin havaintosuureisiin, havaintolaitteiden lukumääriin sekä systemaattisten virheiden korjaustekniikoihin. [10, 280–293.]

Laajimmin käytetty sovellus on absoluuttinen paikannus eli GPS-navigointi. GPS-paikannuksessa paikan määrittäminen perustuu satelliittien asemaan. Käyttöön tarvitaan vain yksi havaintolaite, mutta järjestelmän paikannustarkkuus on vaatimattomalla tasolla verrattuna koneohjauksen vaatimuksiin. [10, 293; 19, 28.]

Myös differentiaalisessa paikannuksessa sijainnin laskenta tapahtuu satelliittien suhteen. Mittaustarkkuus on kuitenkin suurempi johtuen tukiaseman avulla korjatusta systemaattisesta mittausvirheestä. Virheiden korjaaminen liittyy pääasiassa satelliittilohkon ja ilmakehän aiheuttamiin virheisiin. DGPS-järjestelmää voidaan hyödyntää xy-tason koneohjausjärjestelmien paikannuksessa. [10, 293; 19, 28.]

Tarkin kolmesta satelliittipaikannukseen perustuvasta mittautavasta on suhteellinen eli interferometrinen mittausta. Suhteellinen mittausta on eniten käytetty satelliittipaikannusjärjestelmä koneohjauksessa ja muissa tarkkuutta vaativissa töissä. Kahdella samanaikaisesti mittaavalla havaintolaitteella päästään parhaimmillaan noin viiden senttimetrin tai jopa millimetrien tarkkuuteen. Koneohjausjärjestelmissä usein käytetty RTK-GPS-paikannusjärjestelmä tarvitsee liik-

kuvan paikantimen lisäksi myös paikoillaan olevan vertailuvastaanottimen. [10, 294–315; 19, 28.] Taulukossa 6 on esitetty paikannusjärjestelmien mittatarkkuuksia ja kustannusarvioita.

Taulukko 6. Paikannusjärjestelmien tarkkuus ja hintaluokka [19, 27]

<b>Vaadittava paikannustarkkuus</b>	<b>Paikannustekniikka</b>	<b>Paikannuslaitteen hinta</b>
< 10 m 2D	GPS	300 €
< 1 m 2D	DGPS	5000 € – 10000 €
< 5 cm 3D	RTK-GPS	35 000 € – 50 000 € *)
< 5 mm 3D	ATS-takymetri	30 000 € – 45 000 €

## 2.4 Koneohjaus

Koneohjaus on työkoneen toimintojen ja työsuoritusten avustamista tai ohjaamista valmiin suunnitelman ja reaaliaikaisen seurannan ja mittausdatan avulla. Koneohjauksen periaatteena on siirtää koneohjausmallin ja -järjestelmän avulla rakennettavan kohteen suunnitelma suoraan työvaiheeseen. Työkoneen paikantamiseen käytetään työmaasta, työvaiheesta ja niiden vaatimuksista riippuen takymetriä, satelliittipaikannusta, tasolaseria tai näiden yhdistelmiä ja lisäksi sopivia vastaanottimia. [18; 19; 20.]

Koneohjausjärjestelmät voidaan luokitella niiden sisältämän automaatioasteen mukaan viiteen eri luokkaan. Automaatiotason valinta riippuu työmaan vaatimuksista, työmaan vaiheesta sekä siitä, kuinka suuria säästöjä järjestelmän käytöllä pyritään saamaan verrattuna syntyviin kustannuksiin. Taulukossa 7 on esitetty automaatiotasot sekä niiden selitykset yleisellä tasolla. [19.]

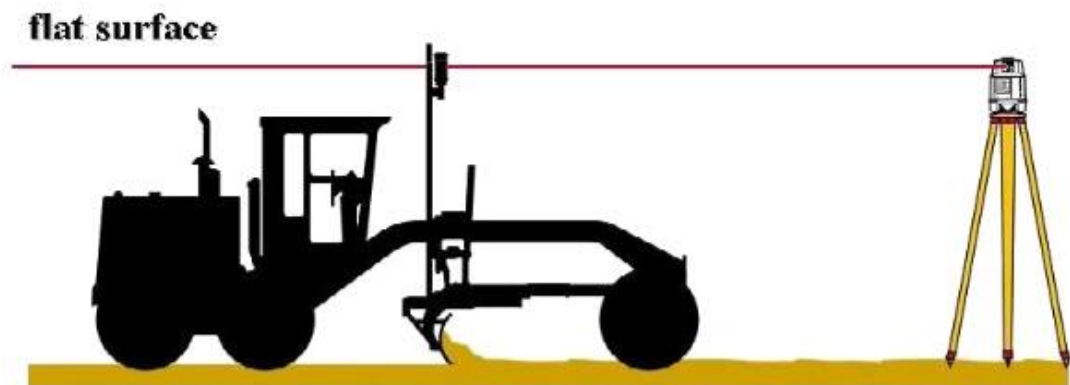


Taulukko 7. Koneohjausjärjestelmien luokittelu automaatioasteen mukaan [19, 16]

Taso	Automaatioaste	Ominaisuudet
1	Kuljettajaa opastava	Ohjaus tapahtuu manuaalisesti järjestelmän opastamana
2	Koordinoitu ohjaus	Koneen liikkeiden ohjaus manuaalisesti karteesisessä koordinaatistossa mahdollista
3	Osittain automatisoitu	Koneen yksittäisiä työliikkeitä säädetään automaattisesti kuljettajan antaman asetusarvon mukaisesti
4	Täysin automatisoitu	Koneen työliikkeitä säädetään automaattisesti kuljettajan valvonnassa
5	Autonominen järjestelmä	Automaattinen työsuoritus ilman kuljettajaa

Kuljettajaa opastavissa koneohjausjärjestelmissä kuljettaja itse ajaa työkonetta ja ohjaa koneen toimilaitteita manuaalisesti. Työkoneeseen voidaan liittää mitausjärjestelmiä, jotka opastavat ja ilmoittavat esimerkiksi merkkivalojen tai grafiikan avulla, kun haluttu taso tai kaltevuus on saavutettu. Järjestelmää käytetään esimerkiksi kaivinkoneiden kaivussyvyyden näyttötauluissa. [19, 17.]

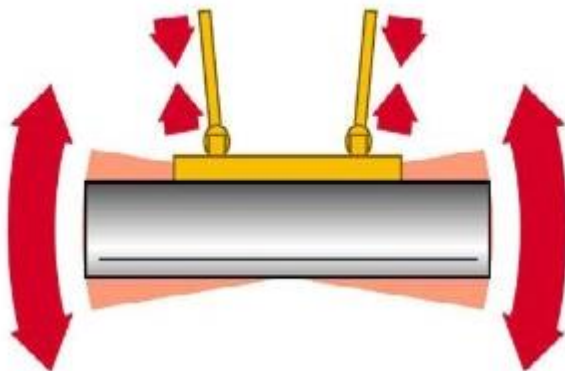
Koordinoidussa ohjauksessa automatiikka ohjaa koneen yksittäisiä toimilaitteita. Kuljettajan tehtäväksi jää ohjata itse työkonetta sekä työkalun liikettä kaksiulotteisessa koordinaatistossa. Tiehöylän terän ohjaus on yksi esimerkki, johon järjestelmää voidaan hyödyntää (kuva 9). [19, 17.]



Kuva 9. Tiehöylän terän korkeuden hallinta [18]



Osittaisessa automatisoinnissa koneohjausjärjestelmä näyttää koneen varsinaisen sijainnin käyttäjälle ja hallinnoi korkeustasoa sekä kallistuksia [20]. Työvaiheen aikana koneen kuljettaja asettaa ja tarvittaessa muuttaa järjestelmän tarvitsemia asetusarvoja. Osa koneen työliikkeistä on automatisoituja ja osa manuaalisesti hallittavia. Tätä järjestelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi tiehöylän terän kallistusautomaatiikassa (kuva 10). [19, 17.]



Kuva 10. Tiehöylän kallistuksensäätö [18]

Täysautomaattisessa järjestelmässä kuljettajan ainoat tehtävät ovat ohjata työkonetta, tarkkailla automaatiojärjestelmän toimintaa ja erityistilanteissa ajaa konetta manuaalisesti. Automaatiikka hallinnoi koneen toimilaitteita ja hydraulikkaa koneen ajamista lukuun ottamatta. Kyseessä on niin kutsuttu 3D-koneohjattu järjestelmä, jossa koneen kontrollointi tapahtuu reaaliaikaisen paikannuksen ja koneohjausmallin pohjalta. [19, 17; 20.]

Autonomisella koneohjausjärjestelmällä tarkoitetaan täysin itsenäisesti koneohjausmallin ja paikannusjärjestelmän perusteella toimivaa työkonetta, jossa ei ole kuljettajaa. Kyseisiä järjestelmiä ei ole ainakaan laajemmassa kaupallisessa käytössä, mutta aiheesta on tehty tutkimusta esimerkiksi Carnegie Mellonin ja Iowan yliopistoissa. Järjestelmän soveltuvuutta on kokeiltu työvaiheen toistoa sisältävässä massanvaihtokohteessa, jossa kaivinkone kuormasi kaivetut maa-ainekset kuorma-auton kyytiin itsenäisesti. [17, 174; 21, 8; 22.]

Koneohjausjärjestelmiä voidaan luokitella myös käytetyn mittaus- ja paikannustekniikan perusteella. Korkeuden mittaus voi olla joko suhteellista tai absoluuttista. Suhteellinen mittaus toteutetaan määrittämällä ulkoinen referenssitaso

suhteessa koneen työkaluun. Referenssitaso voi olla jokin olemassa oleva muuttumaton korkeusasema, kuten vanha tien pinta, josta on otettu referenssimitta. Absoluuttisella mittauksella tarkoitetaan koneen työkalun korkoaseman sitomista työmaan koordinaatistoon. Taulukossa 8 on eritelty ohjausjärjestelmät mittaustavan perusteella. [19, 18.]

Taulukko 8. Koneohjausjärjestelmien mittausperiaatteet [19, 18]

Taso	Dim.	x-y	z	Kuvaus	Mittaustekniikka
1	1D	-	-	Korkeuden mittaus koneen sisäisessä koordinaatistossa	Toimilaitteiden paikka-anturit
2	1D	-	R	Korkeuden mittaus ulkoisesta referenssitasosta, esim. tien pinnasta	Etäisyysanturit (esim. ultraääni-anturit)
3	1D	-	A	Absoluuttisen korkeuden mittaus työmaan koordinaatistossa	Lasertaso
4	2D	A	-	Absoluuttinen x,y-paikan mittaus työmaan koordinaatistossa	GPS tai DGPS
5	3D	A	A	Absoluuttisen x,y,z-paikan mittaus työmaan koordinaatistossa	RTK-GPS- tai ATS-takymetri

*R = Suhteellinen mittaus käytettävästä referenssitasosta, esim. tien pinnasta*

*A = Absoluuttinen mittaus työmaan koordinaatistossa*

Taulukossa 7 esitettyjen koneohjausjärjestelmien eri mittaustekniikat eivät välttämättä ole erillisiä ja toisiaan pois sulkevia. Esimerkiksi absoluuttinen xy-paikan määrittäminen GPS-järjestelmän avulla voidaan yhdistää tarpeen mukaan suhteelliseen z-korkeusaseman määrittämiseen. Näin on tehty esimerkiksi vanhan asfalttipinnan tasaus- ja jyrsintätöissä [28; 30]. Myös kaivinkoneella tehtävissä töissä voidaan yhdistellä koneen sijainnin paikantavaa GPS-järjestelmää sekä z-tason määrittävää tasolaseria [31]. Usein GPS-paikannuksen lisäksi joudutaan määrittämään koneen asento x- ja y-akselien suhteen, jotka voidaan mitata esimerkiksi kallistusantureiden avulla. [19, 19.]

Koneohjauksessa käytettäviä GPS-paikannus- ja ATS-takymetriajärjestelmiä käytetään tarkoituksesta riippuen hieman erilaisissa työvaiheissa ja työkoneissa. GPS-paikannusjärjestelmiä käytetään yleisimmin kaivinkoneella ja puskukoneella tehtäviin karkeampiin materiaalin siirtoihin. Takymetriteknologiaa käytetään usein tiehöylällä tehtävissä pinnan profilointitöissä. Tarkkuutta vaativissa työvaiheissa, joissa pyritään alle 20 millimetrin mittatarkkuuteen, molempien lai-

tejärjestelmien kustannustaso on melko sama (taulukko 5). GPS-laitteiston käyttö verrattuna takymetriin on jokseenkin helpompaa. Takymetrin käyttöalue on rajoittuneempi kuin GPS-järjestelmän, ja sitä joudutaan siirtämään työn edistytessä ja katvealueiden peittäessä työkoneen. Lisäksi takymetrin pystytykseen ja orientointiin kuluu hieman pidempi aika kuin GPS-laitteiston käyttöön alustamiseen. Takymetrillä päästään kuitenkin tarkempiin tuloksiin kuin RTK-GPS-järjestelmillä. [19, 26.]

#### **2.4.1 Koneohjaus- ja tietomalli**

Koneohjausmalli on suunnitelmien pohjalta tehty tiedosto, jota työkoneeseen asennettu ohjausjärjestelmä osaa lukea. Suunnitelma on tehty tavallisesti pinnantasaussuunnitelmasta, sillä koneohjausmallissa täytyy olla korkotietoja mukana. Aineisto on oltava CAD-tiedostona esimerkiksi DWG-, DXF- tai LandXML-muodossa. Suurin osa valmistajien koneohjauslaitteista lukee suoraan edellä mainittuja avoimia tiedostomuotoja, mutta osa käyttää omia tiedostomuotoja. Tällöin CAD-tiedosto on muutettava koneohjausvalmistajan vaatimaan tiedostformaattiin. [24; 26.]

Jos lähtötietojen pohjana toimiva suunnitelma on kaksiulotteinen, joudutaan se muokkaamaan koneohjausta varten kolmiulotteiseksi. Tämä tapahtuu suurimaksi osaksi manuaalisesti syöttämällä kaksiulotteisille viivoille korkotietoja CAD-ohjelmassa. Alkuperäisten taiteviivojen ja korkeuskäyrien lisäksi pintamallin kolmiointia varten joudutaan usein myös lisäämään taiteviivoja esimerkiksi reunakivien tai jiiri- ja harjalinjojen kohdalle. Koneohjausjärjestelmästä riippuen suunnitelmasta erotellaan tarvittavat tiedot. [26.]

Koneohjausmalli voi pohjautua myös suurempaan kokonaisuuteen, infraraken-tamisen tietomalliin. Tietomalliksi kutsutaan kokonaisuutta, joka sisältää rakennuksen tai infrarakenteen koko elinkaaren kattavat tiedot sähköisessä muodossa. Rakennushankkeen elinkaareen kuuluvat rakennusurakan vaatimusten määrittely, urakan suunnittelu, tekninen suunnittelu, varsinainen rakentaminen, käyttö, huolto ja käytön lopettaminen. Tietomalli voi sisältää esimerkiksi kolmi-

ulotteisen suunnitelman kohteesta, materiaalien rajapinnat sekä abstrakteja käsitteitä, kuten prosessivaiheita, laatumääritelmiä, aikatauluja ja kustannuksia. Tietomallista saatava informaatio voidaan esittää kaksi- tai kolmiulotteisena. [17; 21, 5–6; 25.]

#### **2.4.2 Nykytilanne ja tulevaisuus**

Suomessa infrarakentamisen tietomallintaminen ja koneohjaukseen perustuva rakentaminen on toistaiseksi ollut vielä kohtalaisen vähäistä. Viime vuosina kysyntä ja kiinnostus asiaan ovat kuitenkin lisääntyneet. Esimerkiksi Liikennevirasto on mukana Inframallintamisen yhteistyöfoorumissa (InfraBIM) edistämässä ja kehittämässä infrarakentamista älykkäämpään suuntaan. Eri puolilla Suomea on ollut kymmeniä pilottikohteita, joihin ovat osallistuneet kaikki merkittävimmät infratoimijat. [21, 8; 23.]

Norjassa, Ruotsissa ja Hollannissa pääasiassa kaikki suuret väylähankkeet on rakennettu koneohjaukseen hyödyntäen. Yhdysvallat ja Australia ovat edelläkävijöitä koneohjauksen käyttämisessä rakennuskohteissa sekä koneohjaustekniikan kehityksessä ja tutkimuksessa. [21, 8.]

### **3 NCC:n työmaiden nykytilan kuvaus**

#### **3.1 Perinteiset työmenetelmät NCC:llä**

Perinteisellä pihatyömaalla asfalttiurakoitsijan mittaukset on perustunut yleensä manuaaliseen paikalleen määrittämiseen. Alueen rajojen sijainti on määrittynyt hyvin pitkälle maanrakentajan rakentaman pohjarakenteen myötä. Rajojen tarkastaminen on tehty vertaamalla suunnitelman mittoja esimerkiksi rakennuksen seinästä alueen rajalle mittapyörällä tai nauhamitalla mitattuun tulokseen. Mitta-

pyörä on kuitenkin epätasaisella alustalla erittäin epäluotettava mittalaite. Korkeustason määrittäminen on perustunut tasolaseriin ja lattaan, jolloin tuloksen pitäisi olla tarkka, mikäli mittalaitteita on käytetty oikein. Asfaltointi ja siihen liittyvä pohjarakentaminen ovat kuitenkin pihatyömaan viimeisiä toimenpiteitä, ja yleensä autojen lämmitys- ja valaistustolpat on asennettu tässä vaiheessa. Tolpanjalkojen näkymä ja mahdolliset reunakivet asettavat korkovaatimuksia, ja näiden osalta on usein ollut havaittavissa joko suunnitelmaan tai asennukseen liittyviä virheitä. Tasolaserilla on kuitenkin mitattu yleensä vain kriittiset kohdat, joihin lukeutuvat pintavesikaivot ja alueen nurkat. Muihin virheisiin on törmätty vasta rakennustyön edetessä.

Asfalttipohjien rakentaminen alkaa aloituspalaverista ja alkukatselmuksesta. Katselmuksen yhteydessä käydään läpi tilaajan vaatimukset ja toiveet sekä rakennettavan alueen rajat ja korkotasot. Alkukatselmuksen aikana tai sen jälkeen urakoitsijan työnjohtaja mittaa alueen pinta-alan ja mahdollisuuksien mukaan selvittää, ovatko nykyiset korot siinä tasossa, josta tasauserrosta voidaan alkaa sopimuksen mukaisesti rakentamaan. Tarvittavan korkotason määrittäminen on yleensä hankalaa tilanteissa, joissa pihan suunnitelmat ovat puutteelliset tai suunnitelmia ei ole lainkaan. Tarjouksessa on yleensä laskettu pohjatöiden hintaan kuuluvaksi 50 mm:n paksuinen tasauserros raekooltaan 0 – 32 mm:stä kalliomursketta. Usein tarjoukseen sisältyvä murskemäärä ei ole riittävä, vaan tarvittavan korkotason ja vaadittujen kallistusten saavuttamiseksi on rakennettava alueelle paksumpi täyttökerros. Näistä tilanteista on erikseen tiedotettava tilaajaa ja toimenpiteistä on sovittava, jos siitä ei ole aiemmin sovittu tilaajan kanssa.

Pohjaryhmä levittää tarjouksen mukaisen määrän tasauserroa rakennettavalle pohjalle koneellisesti. Tasauserroksen levitykselle on käytössä useampia termejä. Yleisesti käytössä ovat profilointi ja leveling, eli niin sanotusti tasoon saattaminen [4]. Pohjarakenteen profilointiin käytetään tavallisesti tiehöylää ja pientä kauhakuormaajaa, kuten Bobcatia. Ennen profilointia raakapohja, eli muotoilematon rakennekerros, tulisi vielä kertaalleen tiivistää, sillä pienemmillä työmailla on harvoin saatavilla dataa maanrakentajan tiivistystyöstä ja sen tu-

loksista. Terminä raakapohjalla voidaan tarkoittaa sekä jakavaa että kantavaa kerrosta riippuen maanrakentajan ja asfalttiurakoitsijan urakkarajoista.

Profilointiin tarvittava tasausmurske tuodaan paikalle yleensä perävaunullisilla kuorma-autoilla, eli niin sanotuilla kasettiautoilla. Määrästä riippuen mursketta voidaan kuljettaa myös pienemmillä yksiköillä kuten kuorma-autojen nupeilla. Murskekuorma puretaan kuorma-auton lavalta levittämällä se matoksi rakennettavalle alueelle. Tämä tapahtuu kiinnittämällä ketjut kuorma-auton lavan takalaitaan siten, ettei perälauta avaudu liian suureksi. Tämän jälkeen annetaan kuorma-auton kuljettajalle ohjeet aloitus- ja lopetuspaikasta sekä levitettävän murskematon paksuudesta. Kuorma-autolla ajetaan hitaasti lava ylös nostettuna ja avataan takalaita, jolloin mursketta valuu ulos tasaiseksi matoksi (kuva 11). Murske levitetään tavallisesti noin 5 – 10 cm:n paksuiseksi kerrokseksi.



Kuva 11. Murskeen levitys kuorma-auton lavalta

Varsinainen profilointi tapahtuu työntämällä tiehöylän keskiterällä mursketta eteenpäin siten, että terän kallistus ja korkeusasema levittävät murskeen vaadit-

tuun pinnantasoon tiivistymisvara huomioiden. Tätä toistetaan niin kauan, että piha on profiloitu suunnitelman mukaiseen tai muuten pintavesien hallinnan kannalta toimivaan muotoon. Kun halutut pinnanmuodot on rakennettu, tiivistetään alue jyräämällä. Usein rakennekerros saattaa painua vielä tässä vaiheessa epätasaisesti, jolloin syntynyt painauma on korjattava ja sen jälkeen tiivistettävä vielä uudelleen. Kastelun merkitystä profiloinnin ja tiivistymisen kannalta ei voi korostaa liikaa. Parhaaseen tulokseen tiivistymisen kannalta päästään, kun työmaalle levitettyä mursketta kastellaan esimerkiksi kasteluautolla. Veden määrä on oikea, kun saavutetaan optimivesipitoisuus. Myös työturvallisuuden kannalta kasteleminen on tärkeää, sillä pölyävä murske on haitallista hengityselimistöille.

### **3.2 Koneohjauksen hyödyntäminen NCC:llä**

NCC Roads:lla koneohjauksen hyödyntäminen profiloinnissa on vielä toistaiseksi ollut vähäistä. Erään arvion mukaan vuonna 2015 rakennetuista työmaista alle 10 prosentissa on ollut käytössä koneohjaustekniikkaa [28]. Asfalttipohjien profiloinnissa käytettävät koneohjattavat laitteet ovat pääasiassa takymetriohjattuja tiehöyliä. Myös muihin työkoneisiin, kuten pieniin kuormaajiin ja tiivistysjyriin, on saatavilla koneohjaus- ja paikannusjärjestelmiä.

Koneohjausta voidaan hyödyntää myös muissa asfalttoinnin työvaiheissa. Esimerkiksi valtion urakoissa koneohjattua jyräystä ja remix-pintauksia on hyödynnetty laajemminkin. Asfalttilevittimissä ja tiivistysjyrissä voidaan käyttää hyvin eritasoisia koneohjausjärjestelmiä. Asfalttilevittimien tyypillisin automaatiotaso (osittain automatisoitu) huolehtii perän toiminnoista (taulukko 6, taso 3). Tällöin levittimen perän korkeustaso säätyy tunnistimen avulla automaattisesti esimerkiksi viereisen kaistan massapaksuuden perusteella. Myös asfalttimassan syöttö tapahtuu automaattisesti. Levittimen perässä esitiivistykseen käytetään myös palkin täryä. Perämiehen tehtäväksi jää perän leveyden säätäminen sekä muiden toimintojen ja laadun tarkkailu. Kyseinen ohjausjärjestelmä on yleisesti käytössä myös NCC Roadsilla.



## 4 Havaitut koneohjauksen mahdollisuudet

### 4.1 Työmaan esittely

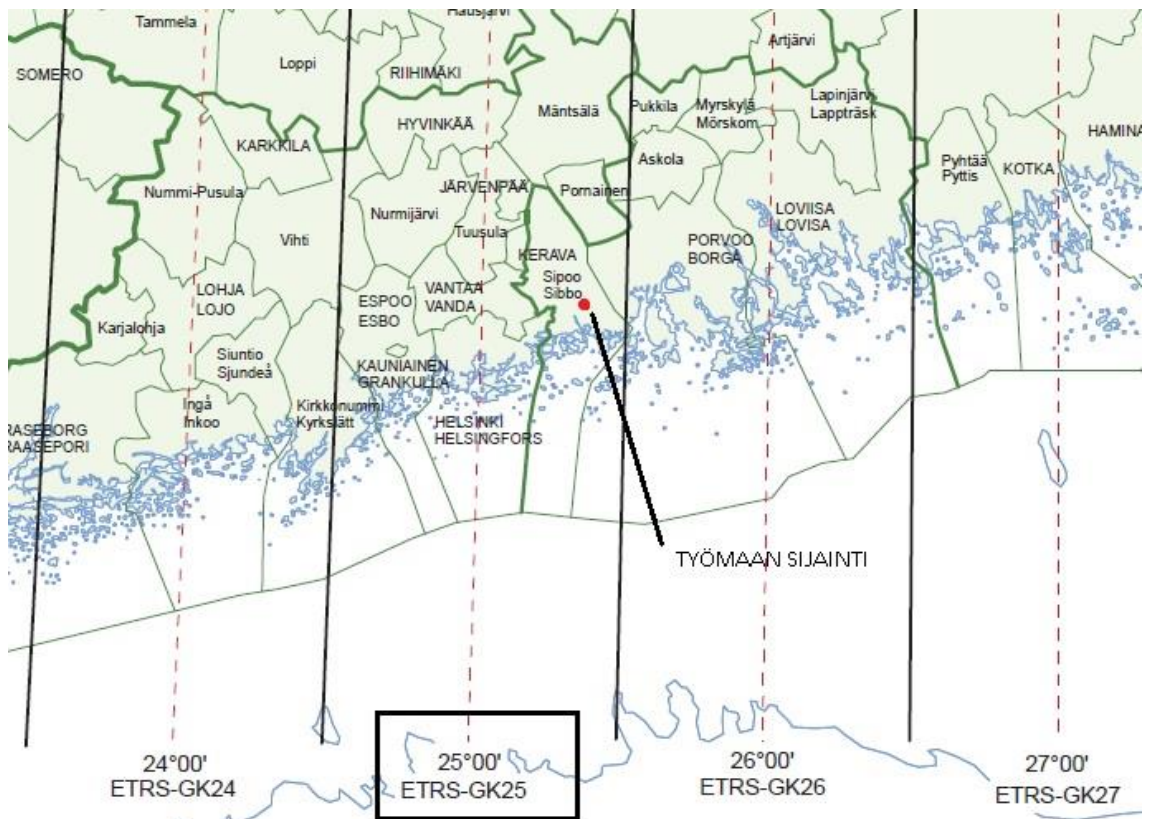
Opinnäytetyön esimerkkityömaana oli As Oy Sipoon Niitty, Manteli ja Pähkinälehto, joka oli NCC Rakennuksen urakoima kerrostalotyömaa Itä-Uudellamaalla. Työmaa jakautui neljään erillään olevaan lohkokoon, joista kaksi oli parkkipaikkoja ja kaksi pihakäytäviä. Rakennettavia kerrostaloja oli tontilla yhteensä kolme. Pihakäytävät olivat rakennusten välissä ja pysäköintialueet kerrostalojen pohjois- ja eteläpäädyissä (kuva 12). Alueelle jätettiin myös varaukset pysäköintialueiden laajentamista varten, mutta niitä ei vielä rakennettu.



Kuva 12. Asfaltoitavat alueet on ympäröity punaisella

Työmaan suunnitelmat oli sidottu ETRS-GK25 -koordinaatistoon ja korkeusjärjestelmänä oli N2000. Työmaan sijainti ja sen suhde koordinaatiston keskimeridiaaniin on esitetty kuvassa 13. Varsinaisista suunnitelmista vain yksi oli mainittu koordinaatistossa. Työmaan omalta mittamieheltä saatiin tieto käytettävästä korkeusjärjestelmästä. Työmaan suunnitelmat oli skaalattu rakennuspuolella käytettyyn millimetriseseen skaalaukseen, kun taas maanmittauksessa ja koneohjauksessa käytetään metristä skaalausta.





Kuva 13. Työmaan sijainti kartalla ja koordinaatistossa

## 4.2 Työmaalla käytetty kalusto

Työmaa toteutettiin yhteistyössä GM Geomalli Oy:n (myöhemmin Geomalli) ja Katu-Karhu Oy:n (myöhemmin Katu-Karhu) kanssa. Geomalli suunnitteli ja toteutti pääurakoitsijalta saatujen suunnitelmien pohjalta koneohjausmallin. Näitä suunnitelmia ovat asemapiirustus, pihasuunnitelma sekä pinnantasaussuunnitelma. Pihan profilointia varten vuokrattiin Katu-Karhulta höyläryhmä, sillä NCC Roads:illa ei ole käytössä omaa koneohjaukseen soveltuvaa takymetrihöylää. Työmaalla käytetty kalusto ja koneohjaukseen liittyvät laitteet ja järjestelmät on esitetty taulukoissa 9 ja 10.

Taulukko 9. Profilointiin käytetyt työkoneet

Tiehöylä	New Holland 106.7, sis. Takymetriojhauksen (kuva 14)
Kauhakuormaaja	Bobcat S570 (kuva 15)
Tiivistysjyrä	Ammann ARX 45 (kaksivalssijyrä)

Taulukko 10. Paikannukseen ja mittaukseen käytetyt järjestelmät

Robottitakymetri	Trimble SPS730 (kuva 17)
Ohjainyksikkö	Trimble CB450 (kuva 16)
Koneohjausjärjestelmä	Trimble GCS900
Seurantaprisma	Trimble Active Track 360° target (kuva 18)



Kuva 14. Tiehöylä New Holland 106.7 takymetriojhauksella





Kuva 15. Kauhakuormaaja Bobcat S570



Kuva 16. Trimble CB450 -ohjainyksikkö



Kuvat 17. ja 18. Trimble SPS730 robottitakymetri ja Active Track -prisma

### 4.3 Havaintoja työmaalta

Työmaan alkukatselmus tehtiin viikolla 39 (vuosi 2015). Alkukatselmukseen osallistuivat työmaan pääurakoitsijan NCC Rakennuksen työnjohtaja sekä vastaava työnjohtaja. NCC Roads:lta katselmukseen osallistuivat työnjohtoharjoittelija, kyseisen alueen aluepäällikkö sekä työpäällikkö. Katselmuksessa käytiin läpi alueen rajat ja rakennusjärjestys. Rakentamisen alustavaksi aikatauluksi sovittiin viikot 42 – 44 siten, että aloitus tapahtui suurimmasta pysäköintialueesta. Tarkoituksena oli tehdä profilointi- ja asfaltointityö vuorotellen, jotta työmaalle saatiin vapautettua varastotilaa ja jotta seuraavat työvaiheet pääsivät alkamaan. Katselmuksessa ilmoitettiin myös koneohjauksessa tarvittavista lähtötiedoista, kuten reunojen merkitsemisestä sekä mittamiehen määrittämistä orientointipisteistä.



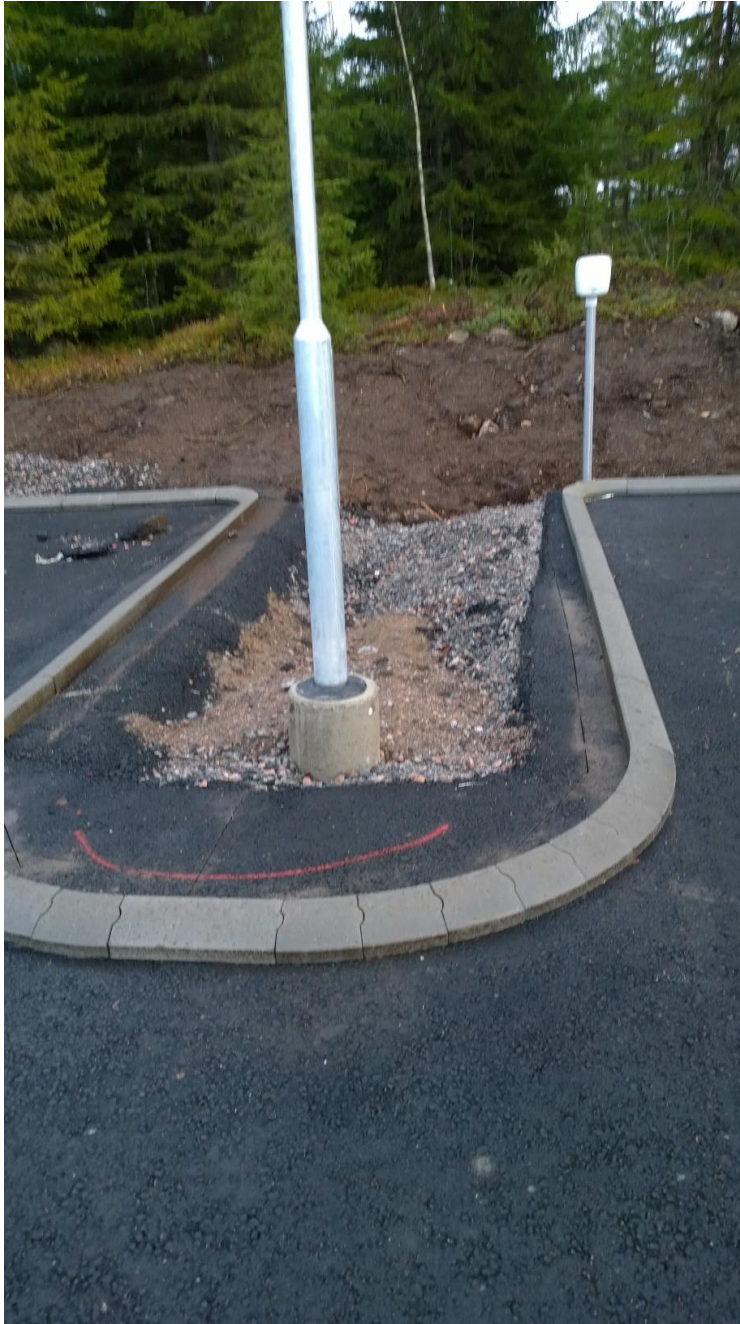




Kuva 20. Virheellinen taiteviiva ohjausnäkyssä

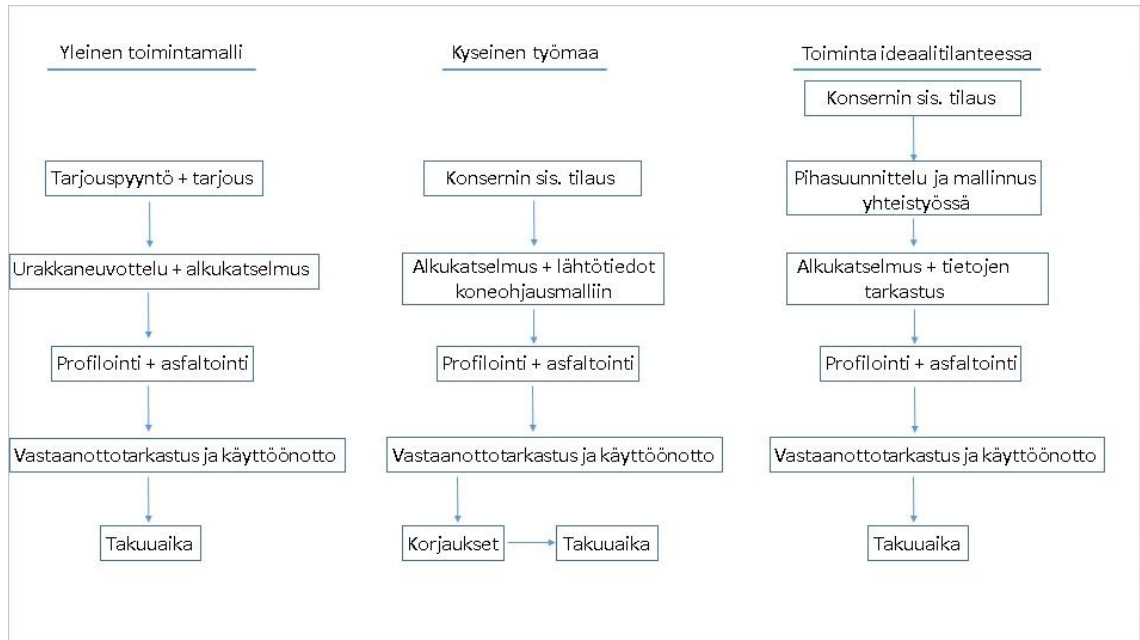
Seuraavien piha-alueiden profilointiin päästiin siirtymään nopealla aikataululla, jolloin alemman pysäköintialueen koneohjausmalli ei ollut vielä valmistunut. Tästä syystä koko loppu työmaa rakennettiin profiloinnin osalta manuaalisesti ilman koneohjausta. Pihakäytävien osalta tämä johtui alueen ahtaudesta. Pihakäytävien profilointi tapahtui manuaalisesti Bobcatilla, sillä tiehöylä olisi ollut liian suuri kapeisiin väliköihin.

Lisää ongelmia havaittiin, kun työmaa oli valmistunut myös asfaltointien osalta. Työmaan sijainti xy-tasossa osoittautui hieman virheelliseksi. Reunakiviasennukset eivät onnistuneet kaikissa reunoissa, ja asfalttia oli myös liian leveästi viheralueiden istutuksiin nähden. Kuvassa 21 näkyy esimerkki ylileveästä alueesta. Työvirheet korjattiin pääurakoitsijan ehtojen mukaisesti, mutta lopulliset vastuukysymykset jäivät selvittämättä. Pihan sijainti oli väärä jo alemmien rakennekerrosten rakentamisen jäljiltä, sillä profiloinnilla ei ollut tarkoituksena enää kasvattaa aluetta leveyssuunnassa.



Kuva 21. Suunniteltu reuna on merkitty punaisella

Ideaalitalanteessa yhteistyö NCC Rakennuksen kanssa kyseisen työmaan osalta olisi alkanut jo keväällä suunnitteluvaiheessa. Tällöin pihasuunnitelmia olisi saatu kehitettyä yhteistyössä koneohjausmallintajan ja pihasuunnittelijan kanssa. Suunnitelmiin puuttuminen yli puoli vuotta niiden valmistumisen jälkeen oli erittäin vaikeaa. Toisaalta osa ongelmista huomattiin vasta työn alettua, joten välttämättä niitä ei olisi huomattu ideaalitalanteesta huolimatta. Kaaviossa 1 on esitetty työmaaprosessin kulkua eri tilanteissa.



Kuvio 1. Työmaaprosessit yleisesti, kyseisellä työmaalla sekä ideaalitalanteessa

## 5 Työn tulokset

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää asfalttipohjien profilointia koneohjauksen avulla. Tutkimusongelmana oli raakapohjien epätarkkuus ja siitä seuraavat ongelmat. Näitä ongelmia ovat esimerkiksi virheelliset kallistukset, korkoasemat sekä raakapohjien yli- tai alitäytöt, joita joudutaan korjaamaan profiloinnin yhteydessä. Myös suunnittelun tason kehittäminen pihasuunnittelun ja koneohjausmallintamisen yhteistyön avulla oli yksi työn tavoitteista.



Työn tulokset on saatu havainnoimalla esimerkkityömaata ja arvioimalla tätä toimintaa. Työmaan avulla käytiin läpi myös mahdollisia koneohjauksen kehitystoimenpiteitä Geomallin kanssa. Opinnäytetyön keskeiset tulokset ovat:

- tämä kirjallinen raportti sekä oppimisprosessi koneohjauksesta
- valmistunut työmaa
- koneohjaukseen tutustuminen ja toiminnan kehitysajatukset
- selkeimmät kipupisteet työmaalla
  - mittaustekniikan hyödyntäminen alkutilanteen kartoituksessa
  - tiedonkulku työmaalla
- kehitysajatukset ongelmien ratkaisemiseksi.

## 6 Pohdintaa

Vaikka koneohjausta ei saatukaan kunnolla hyödynnettyä työmaalla, heräsi syntyneistä ongelmista ja virheistä paljon kehitysideoita. Onnistuneesti käytetyllä koneohjauksella olisi ehkä saatu paremmin vertailtua varsinaista tutkimuksen aihetta, tuotantotehokkuuden paranemista. Samankaltaisten ongelmien ilmaantua myös koneohjaustyömaalla päästään pureutumaan syvemmin ongelman aiheuttajiin. Ongelmat osoittivat selkeät kipupisteet sekä kehittämiskohteet, ja ne toimivat ”lämmittelynä” uuden tekniikan omaksumiselle.

Virheellisiin suunnitelmiin puuttuminen olisi kaikkein helpointa tarjouspyyntövaiheessa, jos riittävän tarkkoja suunnitelmia on jo silloin saatavissa tarjouslaskentaa varten. Silloin jäisi paremmin aikaa perehtyä mahdollisiin puutteisiin ja ongelmiin sekä keskustella niistä tilaajan kanssa. Vaarana tässä on liian suuri resurssien käyttö tilanteessa, jossa tarjousta ei voiteta. Asian lopulliset ja perusteellisemmat ratkaisut saataisiin tehtyä urakkaneuvotteluiden ja sopimuksen teon yhteydessä. Urakasopimusta tehdessä olisi myös hyvä käydä läpi työmaiden yleiset ongelmakohdat, kuten ennalta arvaamattomien painumien

syntyminen tiivistyksen aikana, siitä aiheutuva murskeen ylikulutus sekä muut mahdolliset kallistuksiin ja korkoihin liittyvät riskitekijät.

Tilaajan ja urakoitsijan välisiä työmaakatselmuksia olisi hyvä tehdä ainakin ennen työn aloittamista sekä työn valmistumisen jälkeen. Suositeltavaa olisi tehdä myös välikatselmus riippuen työmaan laajuudesta. Myös epäselvissä tilanteissa ja ongelmien ilmaantuessa täytyy tilaajalle ilmoittaa asiasta mahdollisimman pian ja järjestää asiasta katselmus tai kokous tarpeen mukaan.

Opinnäytetyön tulosten luotettavuutta on hieman vaikea arvioida, sillä kaikki havainnot perustuvat tekijän henkilökohtaisiin huomioihin työmaalta. Osa kehitysideoista on syntynyt tekijän omista ajatuksista ja osa puolestaan yhteistyökumppaneiden kanssa käydyistä keskusteluista. Toisaalta työn tarkoituksena oli perehtyä tekniikkaan ja ongelmien ratkaisuun sen avulla. Työn luotettavuuden arviointia tapahtuu näin ollen myös jatkossa koneohjatuilla työmailla. Työn luotettavuutta lisää työmaan tarkka dokumentointi ja työnkulun läpinäkyvyys.

Opinnäytetyön tekijän kannalta työn tulokset ovat hyvät, sillä oppimista tapahtui paljon ja ymmärrys koneohjauksesta ja sen vaatimuksista syventyivät työn aikana. Toimeksiantajan kannalta työn tulosten arviointi ei ole yksiselitteistä. Työmaa saatiin valmiiksi, vaikkakin ongelmien kautta. Myös koneohjausta päästiin kokeilemaan hetken aikaa, vaikka tarkoitus oli saada koko työmaa toteutuksi tällä tavoin. Rakennusalan kannalta työn tuloksissa ei ole mitään mullistavaa. Poikkeuksena tässä työssä oli käsiteltävän työmaan pieni koko, sillä yleensä vastaavia järjestelmiä on käytetty lähinnä suuremmilla tietyömailla.

Tulevaisuudessa voidaan varmasti nähdä tilanne, jossa työmaa on täysin automoitu. Täysin automoituun työmaahan liittyy kuitenkin aina omat ongelmansa. Paljon toistoa vaativissa työvaiheissa, joissa esimerkiksi kaivinkoneella poistetaan maamassoja tiettyyn pintaan asti, haasteet ovat erilaisia kuin tiehöylällä tehtävässä profiloinnissa. Esimerkiksi tiehöylän työskentelyä olisi joka tapauksessa valvottava manuaalisesti, sillä terässä on aina oltava mursketta. Kaivinkoneen kanssa vastaavat ongelmat aiheutuvat lähinnä siitä, jos maan alta paljastuu suuria kiviä tai kalliopintaa. Toinen kaivinkoneelle aiheutuva haaste on

kuorma-auton tunnistaminen kuormaamistilanteissa, mutta sekin on ratkaistavissa paikannusteknologian ja antureiden avulla. Täysin automoitu työmaa voisi olla mahdollinen laajoissa ja selkeissä tapauksissa, joissa ahtaita tai epäselviä tilanteita ei pääse syntymään. Kehittyneellä paikannusteknologialla ja esimerkiksi laserkeilauksella saataisiin ohjattua murskeet oikeisiin kohtiin ja varmistettua työn edistyminen.

## **7 Kehitysehdotukset ja jatkotutkimuskohteet**

Kehitettävää löytyy kokonaisvaltaisesti koko pihan rakennusurakan profilointivaiheesta. Myös muiden rakennekerrosten rakentamisessa on kehitettävää, mutta niihin ei paneuduta tässä opinnäytetyössä. Moniin ongelmatilanteisiin voidaan kuitenkin soveltaa melko laajasti myös tässä esitettyjä kehitysajatuksia.

Tietomallintamisen kehittäminen on suurin yksittäinen kehityskohde, jolla saadaan karsittua mahdollisia ongelmia ja helpotettua koneohjauksen käyttöönottoa. Valmiista tietomallista nähdään heti ongelmakohdat, jos taiteviivojen ja pinnanmuotojen suhteen on epäloogisuuksia. Näistä epäkohdista on tiedotettava tilaajaa mahdollisimman pikaisesti, mahdollisuuksien mukaan jo urakkaneuvotteluja käydessä.

Mallintamisen ja koneohjauksen käyttöönottoa profilointivaiheessa sekä koko prosessissa helpottaisi, jos myös alempia rakennekerroksia työstävä urakoitsija käyttäisi koneohjattua rakentamista.

Seuraavana kehityskohteena on työnjohdollinen toiminta. Erityisen tärkeää on tarkistaa edellisen työvaiheen jälkeen työn laatu sekä vaatimusten täyttyminen. Tämä olisi hyvä tehdä yhdessä sekä tilaajan (tässä tapauksessa pääurakoitsijan) että aliurakoitsijoiden (maarakentaja ja asfalttiurakoitsija) kanssa. Vaadittujen korkojen ja alueen rajojen määrittäminen olisi hyvä tehdä mittamiehen avustuksella, jolloin saataisiin uskottava ja varmistettu mittaustulos.

Pihasuunnittelijan ja koneohjausmallin tekijöiden työkokemus ei välttämättä kata asfaltin levitysteknistä osaamista, joten asfalttiurakoitsijan työnjohtajan tulisi tarkistaa suunnitelmien toteutettavuus sellaisenaan. Esimerkiksi asfaltin levityksessä jiirien ja harjojen muodot voivat usein olla vaikeasti toteutettavissa. Pihan perusmuotoihin verrattuna viistoon kulkevat jiirit tuottavat levitysteknisiä haasteita. Usein levityssuunta on pihan perusmuodon ja esimerkiksi rakennuksen suuntainen. Tällöin levittäjän perä ei reagoi jiirin pohjaan, vaan suoristaa sen täyttämällä jiirin pohjan asfalttimassalla. Harjojen kohdalla ilmiö on päinvastainen – harjan kohdalle ei jää riittävän paksua kerrosta asfalttia.

Koneohjausaineiston keräämisessä ja mallin tuottamisessa käytävän kommunikation tulisi tapahtua suoraan mittamiehen sekä koneohjausmallin tekijän välillä. Sähköpostikeskusteluista tulisi lähettää kopio työnjohtajalle tai muulle vastuushenkilölle työn etenemisen seuraamiseksi ja kokonaiskuvan hahmottamiseksi. Lisäksi kaikki tiedot tulisi dokumentoida siten, että ne ovat asianomaisten saatavilla ja ajan tasalla.

Tämän opinnäytetyön pohjalta olisi mahdollista tehdä myös jatkotutkimuksia. Mahdollisia jatkotutkimuskohteita voisivat olla koneohjauksen taloudellisuuden selvittäminen, useamman koneohjatun työmaan samanaikainen seuranta sekä koneohjauksen soveltuminen erityyppisille työmaille. Myös eri koneohjaustekniikoiden käyttöä ja toimivuutta olisi mahdollista tutkia.

## Lähteet

1. Marttinen, M. Kehitysajatuksia täkyhöyläilyyn. 2015. Jali.Vahlroos@ncc.fi. 6.10.2015.
2. Jääskeläinen, R. Geotekniikan perusteet. Jyväskylä: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy. 2009.
3. RIL 234-2007 Pihojen pohja- ja päällysrakenteet. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. Helsinki. 2007.
4. Marttinen, M. Työpäällikkö. NCC Roads Oy. Suullinen neuvonanto. 20.1.2016
5. Infra ry. Määrämittausohje. <http://www.rakennustieto.fi/infrarylnet>. 2015.
6. InfraRYL 2010. 21310 Sitomattomat kantavat rakenteet. 2010.
7. NCC Oy. Kiviainestuotteet – esite. <http://viewer.zmags.com/publication/9d17c52f#/9d17c52f/8>. Luettu 21.1.2016
8. RT 89-11002. Pihojen pohja- ja päällysrakenteet. 2010.
9. InfraRYL 2010. 18110 Maapenkereet.
10. Laurila, P. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: RAMK. 2012.
11. Maanmittauslaitos. Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät. <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/koordinaatti-korkeusjarjestelmat>. Luettu 16.1.2016.
12. JUHTA - Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta. JHS 163 Suomen korkeusjärjestelmä N2000. <http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS163/JHS163.html#H5>. Luettu 24.1.2016
13. NCC Ab. Annual report 2014. [http://www.ncc.fi/globalassets/annual-reports/ncc\\_annual\\_report\\_2014.pdf](http://www.ncc.fi/globalassets/annual-reports/ncc_annual_report_2014.pdf).
14. NCC Oy. NCC:n arvot. <http://www.ncc.fi/kestava-kehitys/nccn-arvot/>.
15. Saraste-Mäkinen, L. Roads-tiedote – NCC Groupin organisaatiouudistus. 2015. Jali.Vahlroos@ncc.fi. 21.9.2015.
16. Trimble Navigation Ltd. Trimble – S-sarja takymetrit. [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-761579/022516-168A-FIN\\_S-Series\\_TotalStations\\_BRO\\_0415\\_LR.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-761579/022516-168A-FIN_S-Series_TotalStations_BRO_0415_LR.pdf). 2015. Luettu 20.1.2016.
17. Vähä, P., Heikkilä, T., Järviluoma, M. & Gambao, E. Extending automation of building construction – Survey on potential sensor technologies and robotic applications. Automation in Construction 36. 2013. Rajoitettu saatavuus: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580513001167>. Luettu: 20.1.2016.
18. Ilmonen M. Topgeo Oy. Koneohjausjärjestelmät. <http://www.tampere.fi/ytoteto/kaupunkimittaus/maastotietopalvelu/ikaalinen07/ilmonen.pdf>. Luettu 16.1.2016.
19. Kilpeläinen, P., Nevala, K., Tukeva, P., Rannanjärvi, L., Näyhä, T. & Parkkila, T. VTT Elektroniikka. Älykäs tietyömaa – Tienrakennuskoneiden modulaarinen ohjaus. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2255.pdf>. 2004. Luettu: 20.1.2016.
20. Stempfhuber, W. Leica Geosystems AG. 1D and 3D systems in machine automation. <http://emetrix.gr/gr/downloads/3D%20systems%20technical%20paper.pdf>. 2006. Luettu: 21.1.2016.

21. InfraTM. Tekes loppuraportti. Tietomallit ja koneohjaus katuhankkeissa.  
[http://www.rts.fi/infrabim/InfraTM\\_pilotti\\_Tampere\\_Oulu\\_loppuraportti.pdf](http://www.rts.fi/infrabim/InfraTM_pilotti_Tampere_Oulu_loppuraportti.pdf).  
2010. Luettu: 21.1.2016.
22. White, D. J., Alhasan, A. & Vennapusa, P. (toim.). Iowa State University.  
Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construc-  
tion of Infrastructure.  
[http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1140&context=intrans\\_reports#page=218](http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1140&context=intrans_reports#page=218). 2015. Luettu: 21.1.2016.
23. Inframallintamisen yhteistyöfoorumi. InfraBIM. Infra FINBIM vauhditti infra-  
rakentamisen läpimurtoa. <http://www.infrabim.fi/infra-finbim-vauhditti-inframallintamisen-lapimurtoa/>. 2015. Luettu: 3.2.2016.
24. Geomalli Oy. Esite 3D-koneohjauksesta – Aineiston vähimmäisvaatimukset.  
2015. Luettu 2.12.2015.
25. Liukas, J. & Niskanen, J. Sito Oy & Vianova Systems Finland Oy. Infra-  
tuotemallin hyödyt.  
[http://www.rts.fi/infrabim/Infra\\_tuotetietomallin\\_hyodyt\\_21\\_12\\_2007\\_muistiinpanosivut.pdf](http://www.rts.fi/infrabim/Infra_tuotetietomallin_hyodyt_21_12_2007_muistiinpanosivut.pdf). 2008. Luettu: 7.2.2016.
26. Halonen, O. VS: Sipoon Graniittitien koneohjausmalli. 2016. Ja-  
li.Vahlroos@ncc.fi. 14.1.2016.
27. NCC Ab. Year-end report 2015.  
<http://mb.cision.com/Main/197/9903486/469793.pdf>. Luettu: 9.2.2016.
28. Marttinen, M. Työpäällikkö. NCC Roads Oy. Henkilökohtainen tiedonanto  
31.1.2016.
29. Halonen, O. VL: Sipoon asema- ja pihakuvat dwg. 2015. [Ja-  
li.Vahlroos@ncc.fi](mailto:Ja-li.Vahlroos@ncc.fi). 1.10.2015.
30. Marttinen, M., Heikkilä, R. Relative Information Modelling based Optimiza-  
tion for Asphalt Pavement Renovation.  
<http://www.iaarc.org/publications/fulltext/FFACE-ISARC15-3059091.pdf>.  
2015. Luettu: 22.2.2016.
31. Novatron Oy. Kaivinkoneen 2D- ja 3D-koneohjausjärjestelmät.  
<http://www.xsitemachinecontrol.com/brochure-fi-web.pdf>. 2016. Luettu:  
15.1.2016.